

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroniky**

**Modelování a simulace vybraných analogových  
elektronických obvodů**  
**Modelling and simulation of Selected Analog  
Electronic Circuits**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 7. 5. 2015

.....

Radim Šnirch

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Radim Šnirch**

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612R003 Aplikovaná elektronika

Téma:

Modelování a simulace vybraných analogových elektronických obvodů  
Modelling and Simulation of Selected Analog Electronic Circuits

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor vybraných typů elektronických obvodů.
2. Vytvoření simulačních modelů pomocí programu OrCad - PSpice.
3. Simulace činnosti vybraných typů elektronických obvodů pomocí programu OrCad - PSpice.
4. Analýza výsledků simulací a jejich porovnání s teoretickými předpoklady.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Brandštetter, P.: Elektronika. Učební texty pro kombinované a distanční studium. VŠB-TU Ostrava, 2010.
2. Brandštetter, P. a kol.: Elektronika - prvky elektronických obvodů. Učební text, VŠB-TU Ostrava, 2008, 159 s., ISBN 978-80-248-1481-0.
3. Horowitz, P. - Hill, W.: The Art of Electronics. Cambridge University Press, ISBN 0-521-37095-7, 1989.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2015

doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

**Abstrakt:**

Podstatou bakalářské práce je modelování a simulace vybraných elektronických obvodů, konkrétně z oblasti signálových generátorů a RC oscilátorů v kombinaci s jednoduchými omezovači amplitudy. Simulace se provádí v programu OrCad – Pspice, který je produktem společnosti Cadence Design Systems, Inc., s licencí VŠB – TU Ostrava.

**Klíčová slova:**

Signálový generátor, Oscilátor, Omezovač amplitudy, RC, OrCad

**Abstract:**

The main object of my bachelor thesis is modeling and simulation of selected electronic circuits, specifically in the field of signal generators and RC oscillators in combination with simple amplitude limiters. Simulation is done in OrCad - PSpice, which is a product of Cadence Design Systems, Inc., with licence of VSB - TU Ostrava.

**Key words:**

Signal generator, Oscillator, Amplitude limiter, RC, OrCad

## Seznam použitých symbolů a zkratek:

$A_0$	Zisk při kritickém kmitočtu	(dB)
$A_u$	Napěťový zisk	(dB)
$C$	Kondenzátor	
$D$	Dioda	
$D_Z$	Zenerova dioda	
$f$	Frekvence	(Hz)
$f_0$	Kritický kmitočet	(Hz)
$I$	Proud	(A)
$I_C$	Proud tekoucí kondenzátorem	(A)
$I_E$	Proud tekoucí emitorem	(A)
$P$	Potenciometr	
$R$	Rezistor	
$R_E$	Emitorový rezistor	( $\Omega$ )
$R_f$	Zpětnovazební odpor	( $\Omega$ )
$R_G$	Odpor připojený k vývodu gate u tranzistoru	( $\Omega$ )
$R_P$	Odpor potenciometru	
$R_z$	Odpor zátěže	( $\Omega$ )
$S$	Spínač	
$T$	Tranzistor, Perioda	(- , s)
$t$	čas	
$U$	Napětí	(V)
$U_C$	Napětí na kondenzátoru	(V)
$U_{CC}$	Napájecí napětí	(V)
$U_{CE}$	Napětí mezi kolektorem a emitorem	(V)
$U_{CT}$	Napětí na kolektoru tranzistoru	(V)
$U_{Cmax}$	Maximální napětí na kondenzátoru	(V)
$U_{FZ}$	Propustné napětí Zenerovy diody	(V)
$U_I$	Napětí překlápěcí úrovně komparátoru	(V)
$U_N$	Napětí překlápěcí úrovně komparátoru	(V)
$U_O$	Výstupní napětí	(V)
$U_{Omax}$	Maximální napětí na výstupu	(V)
$U_{RE}$	Napětí na emitorovém odporu	(V)
$U_{ref}$	Referenční napětí	(V)
$U_f$	Řídící napětí	(V)
$U_S$	Výstupní napětí střídače	(V)
$U_{ZD}$	Zenerovo napětí	(V)
$U_{10}$	Výstupní napětí trojúhelníkového signálu	(V)
$U_{20}$	Výstupní napětí obdélníkového signálu	(V)
$\phi$	Fázový posun	( $^\circ$ )
$\pi$	Ludolfovo číslo	

## Obsah:

<b>1. Úvod</b>	8
1.1. Stručný popis PSPICE / OrCad	9
1.2. Generátory Periodického signálu	11
<b>2. Generátory pilovitých signálů</b>	12
2.1. Generátor rostoucího pilovitého napětí s unipolárním tranzistorem	13
2.2. Generátor klesajícího pilovitého napětí s bipolárními tranzistory	15
2.3. Generátor rostoucího pilovitého napětí s Howlandovou pumpou	17
<b>3. Funkční generátory</b>	20
3.1. Funkční generátor s konstantní frekvencí	21
3.2. Funkční generátor s proměnnou frekvencí	24
<b>4. RC Oscilátory s diodovými omezovači amplitudy</b>	27
4.1. Diodový omezovač amplitudy s operačním zesilovačem	27
4.2. Oscilátor s Wienovým členem	29
4.3. Wienův oscilátor s operačním zesilovačem a amplitudovou stabilizací	31
4.4. Wienův oscilátor s alternativní metodou amplitudové stabilizace	34
4.5. Oscilátor s posuvem fáze	36
<b>5. Závěr</b>	39
<b>6. Literatura</b>	40

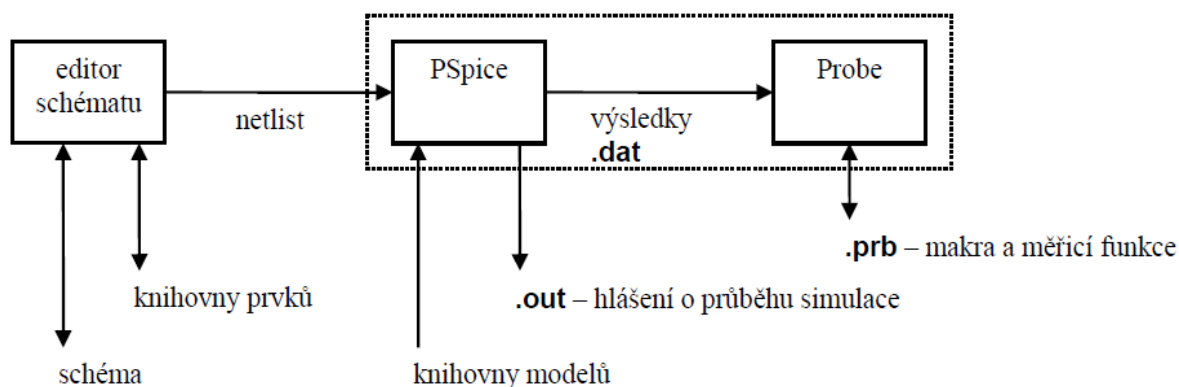
## 1. Úvod

Jako signálový generátor lze definovat libovolné zařízení, vytvářející požadovaný průběh signálu příslušného typu. V závislosti na principu vytváření signálu a na typu výstupního signálu lze tato zařízení dělit do mnoha kategorií. Tyto obvody jsou známé pod názvy jako signálový generátor, funkční generátor, generátor tónu, frekvenční generátor a podobně. Jsou to elektrické obvody, které generují opakující se elektrické signály (kmity) v analogové i digitální podobě. V praxi se mohou používat například pro testování elektrických zařízení jako zkušební vstupní signál, signalizační výstupní signál nebo řídicí signál pro ovládání či regulaci dalších elektrotechnických přístrojů.



## 1.1.Stručný popis PSPICE / OrCad

OrCad Capture je ucelený balík nástrojů pro návrh elektronických schémat včetně využití možnosti přechodu do jiných systémů jako např. návrh plošných spojů, analogové a číslicové simulace a návrh programovatelných obvodů. Základním pilířem návrhu schématu jsou knihovny schématických značek, součástek a symbolů. S ohledem na to, že elektronický průmysl nabízí neustále nové typy součástek, je možné knihovny plynule doplňovat a obměňovat. Vlastní návrh elektronického schématu spočívá ve vyvolání schématických značek z knihovny, jejich umístění na pracovní ploše a propojení jejich vývodů. OrCad Capture umožňuje i hierarchický návrh a různé techniky propojování pomocí vodičů (sběrnice, návěští, napájecí symboly). Kromě výstupů pro náročné analogové a číslicové simulace umožňuje program i účinnou kontrolu návrhových pravidel, která odhalí formální chyby obvodů (nezapojené vstupní piny, výstupní piny zapojené na napájení apod.). Výstupem z návrhu může být tisk schématu na tiskárně, seznamu použitých součástek, různé typy souborů dat v různých formátech umožňující další zpracování schématu (netlist pro generaci plošného spoje, simulaci apod.) [3].



Obr.1.1.1 Blokové schéma programu OrCad

### Vytvoření nového simulačního profilu

Simulační profil (\*.SIM) ukládá nastavení typu simulace tak, aby se dal znovu snadno použít. Před zahájením nové simulace je potřeba vytvořit simulační profil, ve kterém jsou uložena veškerá nastavení (typ analýzy, doba simulace, přesnost, ukládané proměnné, zobrazení výsledků atd.). Klikneme na tlačítko „New Simulation Profile“. V dialogovém okně v položce „name“ napíšeme jméno simulačního profilu, v položce „Inherit From“ (standardně „none“) můžeme zvolit, ze kterého projektu se bude importovat nastavení simulace. Nastavení potvrdíme tlačítkem „Create“. [3]

Pro simulace v rámci této bakalářské práce budou využity základní knihovny součástek, které jsou součástí základní výbavy programu OrCad a použity budou následující typy analýz:

### **Bias Point**

Analýza ukládá detailní informace o pracovních bodech do výstupního souboru simulace. Výstupní soubor, obsahuje záznamy o základních informacích simulovaného obvodu. Výpočet pracovního bodu je doplněn o citlivostní analýzu a malosignálový stejnosměrný přenos. Výsledky analýzy se ukládají do výstupního textového souboru a údaje o pracovním bodu lze zobrazit ve schématu [3].

### **Time Domain (transient)**

Tato analýza patří k nejpoužívanějším analýzám vůbec. Transientní (přechodová) analýza počítá chování obvodu v závislosti na čase. Její nastavení se provádí v nabídkovém listu General Settings. V dialogovém poli Run to Time zadáme délku analýzy a výpočetní krok pro ukládání výsledků. V poli Start saving data after můžeme nastavit časový okamžik, od kterého se začnou ukládat data, v poli Maximum step size pak velikost maximálního výpočetního kroku, který by měl být minimálně o řád nižší než nejmenší časová konstanta obvodu a to z důvodu co nejpřesnější simulace [3].

### **Probe Window**

Grafický výstup obstarává probe Window. Vykresluje průběh veličin, v bodech, ke kterým jsou ve schématech připojeny měřící sondy.

### **Následné uložení výsledků**

K uložení výsledků bohužel v programu PSpice / OrCad není možné využít export do souboru, ale jen kopírování do schránky systému Windows, nebo tisknout pomocí tiskového výstupu programu PSpice A/D. Proto jsou exportované grafy kopírovány skrze schránku do nástroje Windows malování a po úpravě uloženy a vloženy do bakalářské práce.

## 1.2. Generátory Periodického signálu

V této bakalářské práci se budu zabývat pouze generátory signálů a RC oscilátory, které jsou, co se konstrukce týče jednodušší než oscilátory LC, jelikož k jejich realizaci není třeba cívek a hodí se pro nižší kmitočty v řádu jednotek až tisíců Hz. Generátory periodických signálů můžeme rozdělit do mnoha kategorií. Vybral jsem několik základních kritérií, podle kterých je možno generátory dělit [2]:

### a) Podle tvaru časového průběhu

- oscilátory harmonických kmitů
- oscilátory obdélníkových (pravoúhlých) kmitů
- oscilátory trojúhelníkových kmitů
- oscilátory kmitů jiného tvaru

### b) Stálost (stabilita) kmitočtu

Číselně určena absolutní hodnota podílu změny kmitočtu, ke které došlo během určitého časového intervalu a za definovaných provozních podmínek a stabilního kmitočtu.

### c) Laditelnost

Možnost záměrné změny kmitočtu oscilátoru. Rozsah kmitočtů, ve kterém lze u daného oscilátoru uskutečnit ladění, se nazývá přeladitelnost. Podle tohoto hlediska se rozdělují oscilátory na:

- oscilátory s pevným kmitočtem
- oscilátory s proměnným kmitočtem

## 2. Generátory pilovitých signálů

Generátory pilovitých signálů pracují většinou na principu nabíjení a vybíjení kondenzátoru a všechny níže uvedené generátory pilovitého signálu, kterými se budu zabývat, jsou na tomto principu založeny. Tento typ generátoru nachází uplatnění zejména při konstrukci různých převodníků, fázovém řízení, ale setkáváme se s nimi také v časových základnách osciloskopů, a spoustě dalších obvodů. Požadavky kladené na generátory pily jsou, aby byl náběh, i spád napětí lineární. Tomu je třeba uzpůsobit délku řídicího impulzu i kapacitu kondenzátoru.

Perioda pilovitého signálu se skládá ze dvou časových úseků. Jsou to časy  $t_1$  (čas náběhu) a  $t_2$  (čas spádu). Při pilovitém signálu se klade požadavek na to, aby byl čas spádu co nejkratší. U trojúhelníkových signálů je zase nutné, aby časy  $t_1$  a  $t_2$  byly rovny. Přechod, mezi jednotlivými časy je u jednoduchých generátorů tvořen spínačem připojeným paralelně ke kondenzátoru. Často se jedná o tranzistorový spínač řízený pulzním zdrojem.

Frekvenci řídicího impulzu volím pro všechny generátory pilového napětí 100Hz (10ms) takže o generátorech se dá říct, že jsou synchronizovány se síťovým napětím.

## 2.1. Generátor rostoucího pilovitého napětí s unipolárním tranzistorem

Kondenzátor je nabíjen proudem ze zdroje konstantního proudu o velikosti 1mA, který je tvořen unipolárním tranzistorem. Napětí by mělo podle teoretického předpokladu stoupat lineárně, dokud nedojde k sepnutí tranzistorového spínače řízeného impulzním zdrojem. Po příchodu řídicího impulsu se začne kondenzátor vybíjet přes tento spínač a doba vybíjení je určena právě odporem sepnutého unipolárního tranzistoru.

Pro nabíjení kondenzátoru můžeme napsat následující vztah [1]:

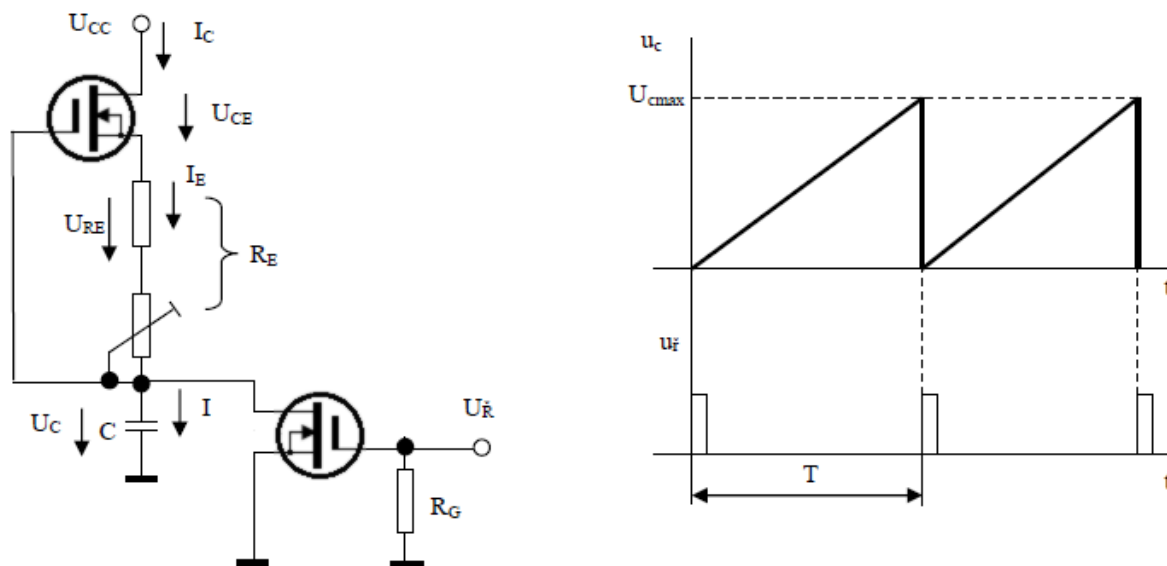
$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt + U_c(t = t_0) \quad (2.1.1)$$

Jelikož vycházíme z možnosti, že počáteční napětí na kondenzátoru je nulové a nabíjecí proud je konstantní, dá se rovnice zjednodušit [1]:

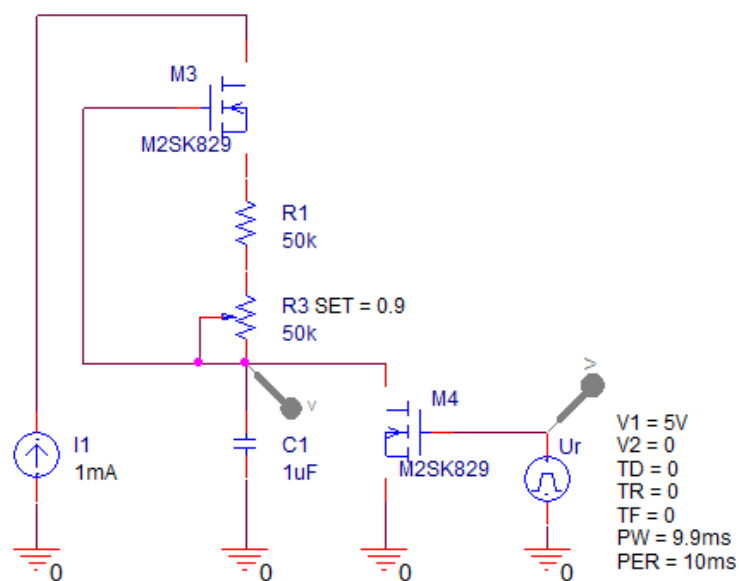
$$u_c(t) = \frac{I}{C} \int dt = \frac{I}{C} t \quad (2.1.2)$$

Pro výpočet maximální hodnoty napětí, která je nejvyšší v čase T, nebo hodnoty napětí v čase jiném můžeme napsat tento vztah [1]:

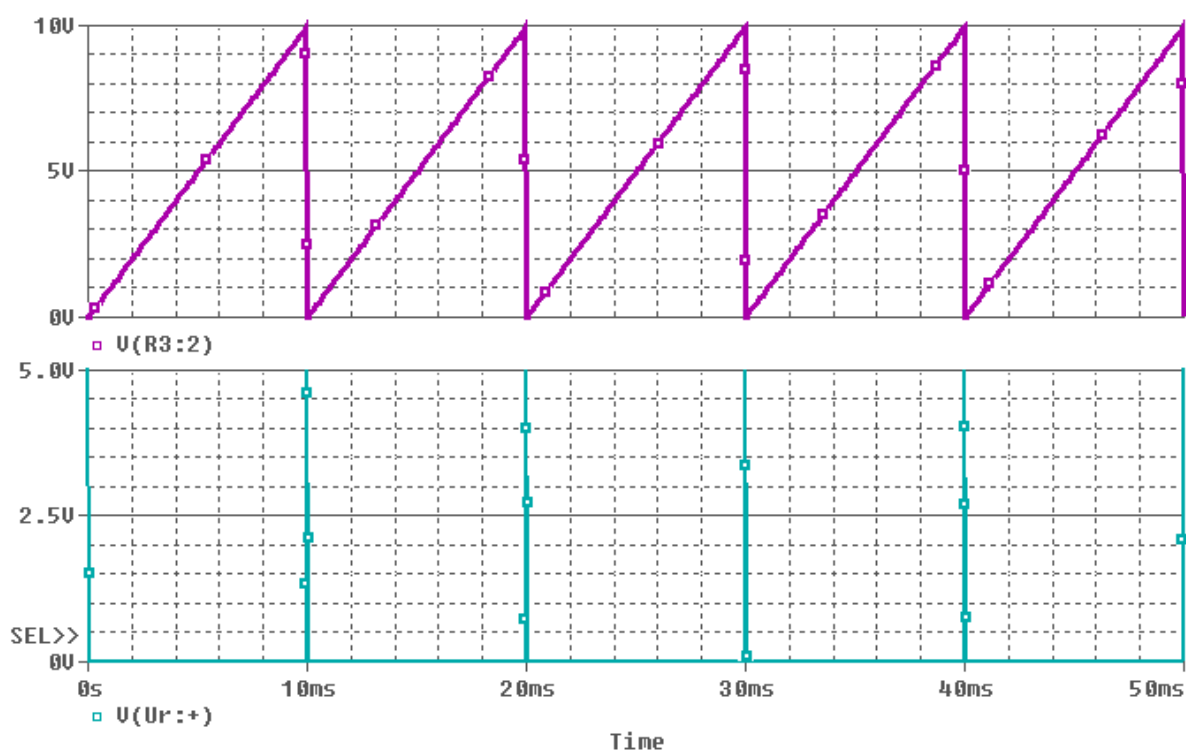
$$u_C \ t_{t=T} = U_{Cmax} = \frac{I}{C} \cdot T = \frac{10^{-3}}{10^{-6}} \cdot 0,01 = 10V \quad (2.1.3)$$



**Obr.2.1.1** Generátor pilovitého průběhu a jeho teoretický průběh v čase [1]



**Obr.2.1.2** schéma zapojení generátoru v prostředí OrCad



**Obr.2.1.3** Průběh simulovaného generátoru pilovitého napětí

### ***Dílčí závěr:***

*Z grafu jsem odečetl maximální napětí na kondenzátoru 10V při konstantním nabíjecím proudu 1mA. Průběh je podle teoretického předpokladu lineární a rovněž se shoduje s výpočtem.*

## 2.2. Generátor klesajícího pilovitého napětí s bipolárními tranzistory

Tento generátor používá jako zdroj konstantního proudu bipolární tranzistor  $T_3$  a tranzistory  $T_1$  a  $T_2$  pracují jako spínače. Kondenzátor je v počátečním stavu nabitý referenčním napětím a vybíjí se sepnutím spínacích tranzistorů přes odpor  $R_0$ . Na výstupu zapojen tranzistor  $T_4$ , který je jako emitorový sledovač, použit pro impedanční přizpůsobení výstupu oscilátoru. Pro simulaci jsem použil zcela běžné tranzistory 2N3904 a 2N3906. [1]

Napětí na kolektoru  $T_3$  je dáno, rozdílem referenčního napětí  $U_{ref}$  a napětím na kondenzátoru  $u_c(t)$  [1] :

$$U_{CT} = U_{ref} - u_c \cdot t \quad (2.2.1)$$

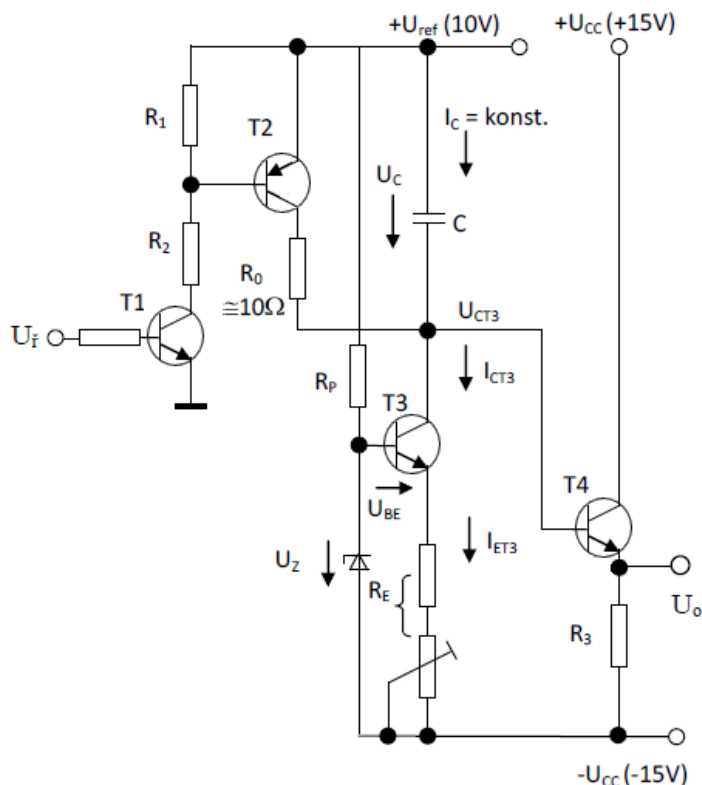
Nabíjecí proud je dán vztahem [1]:

$$I_C \cong I_{CT3} \cong I_{ET3} = \frac{U_Z - U_{BE}}{R_E} = \frac{9 - 0,6}{84 \cdot 10^3} = 100 \mu A \quad (2.2.2)$$

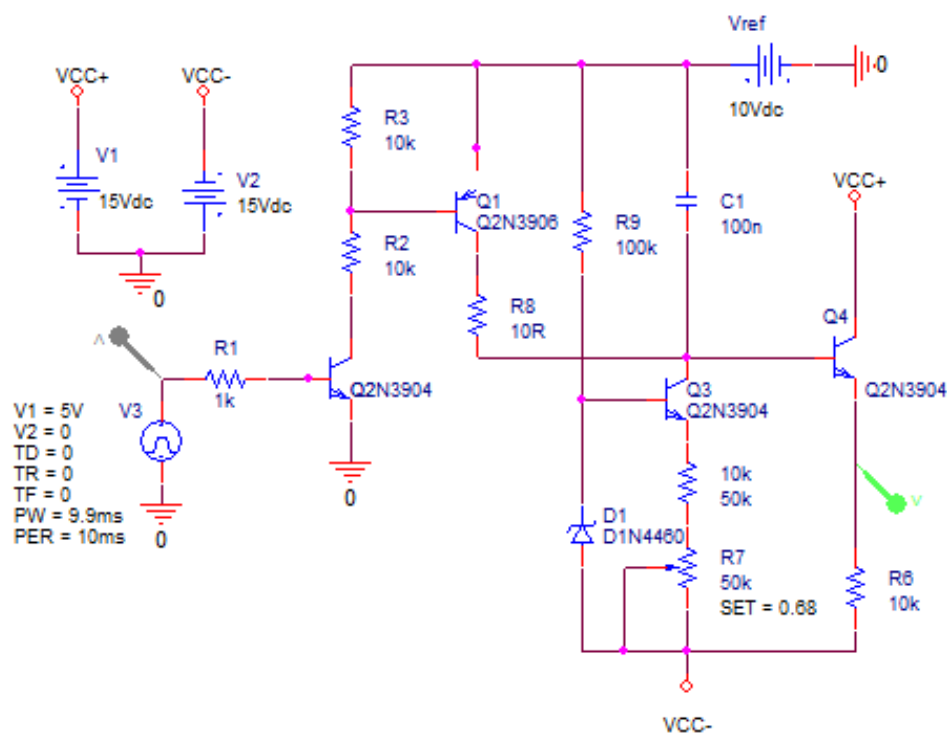
Maximální napětí na kondenzátoru pak určuje vztah [1]:

$$u_c \cdot t_{t=T} = U_{Cmax} = U_{ref} = \frac{I}{C} \cdot T = \frac{10^{-4}}{100 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,01 = 10V \quad (2.2.3)$$

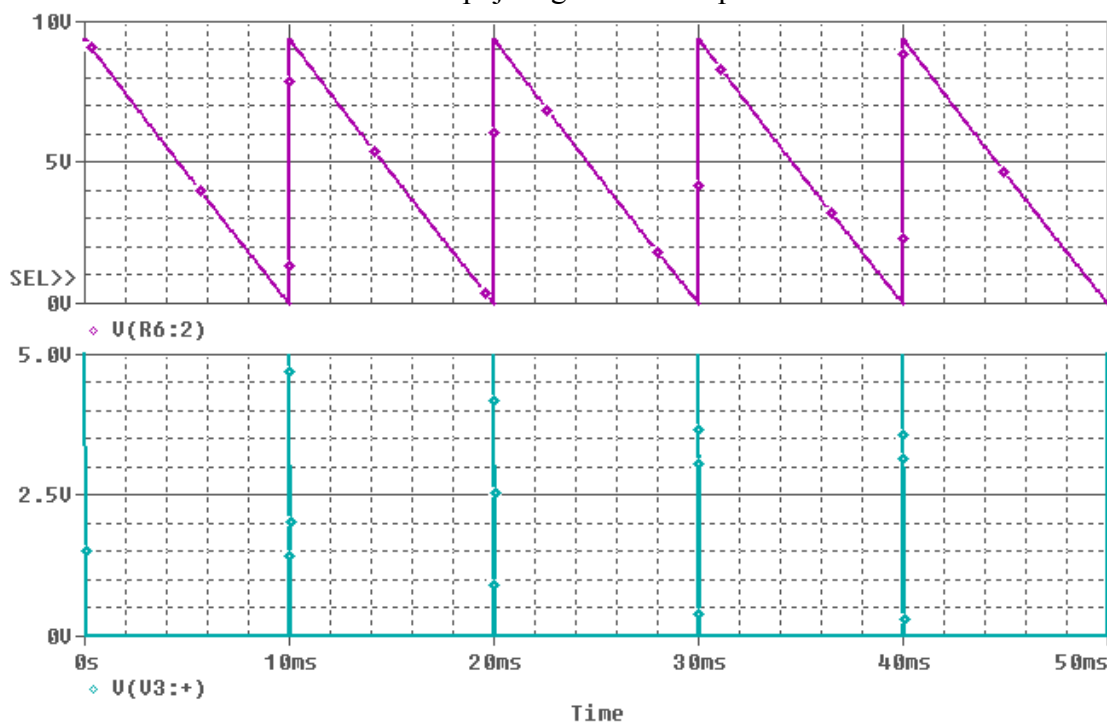
S respektováním rovnice 2.2.1, bude mít pilovité napětí klesající charakter. Rostoucí napětí na kondenzátoru se bude odečítat od referenčního a na konci periody se výstupní napětí bude rovnat nule. To však zaleží také na nastavení trimru u emitoru tranzistoru  $T_3$ . Při malém nabíjecím proudu bude na konci periody kladné napětí a při větším zase záporné.



**Obr.2.2.1** Schéma a teoretický průběh generátoru [1]



**Obr.2.2.2** Schéma zapojení generátoru z prostředí OrCad



**Obr.2.2.3** Grafický průběh napětí generátoru

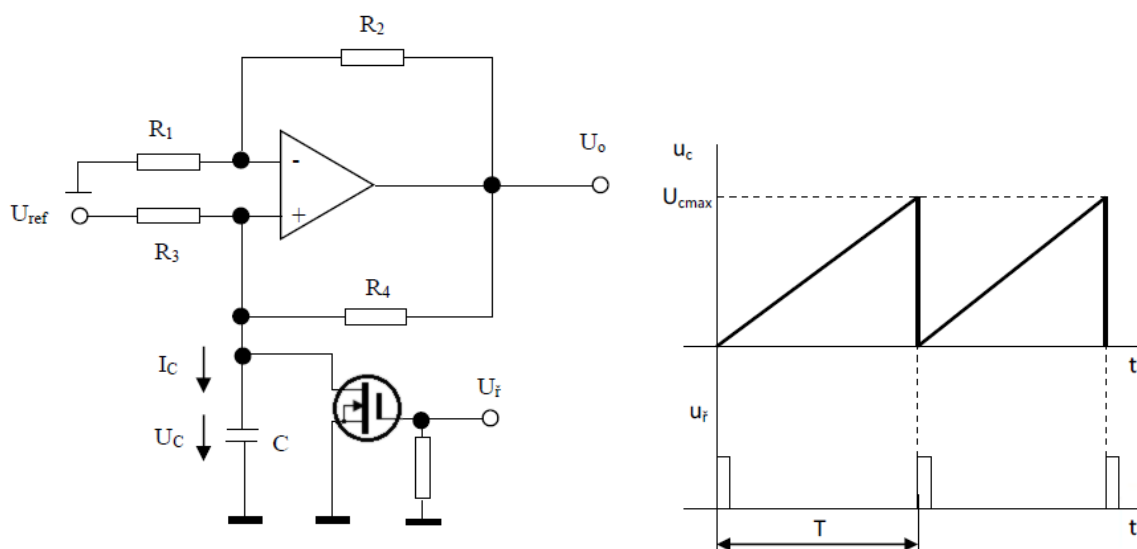
### ***Dílčí závěr:***

*Na grafu generátoru jsem odečetl výstupní napětí 9,2V a konstantní nabíjecí proud 82  $\mu$ A. V tomto případě jsem zaznamenal drobnou nepřesnost oproti výpočtům způsobenou tím, že po teoretickém výpočtu je třeba obvod doladit, jelikož obsahuje více prvků, které ovlivňují rychlost nabíjení a vybíjení.*



## 2.3. Generátor rostoucího pilovitého napětí s Howlandovou pumpou

Tento generátor je tvořen neinvertujícím operačním zesilovačem v našem případě obvodem LM741. Odvod funguje tak, že záporná zpětná vazba určuje zesílení generátoru a k neinvertujícímu vstupu je připojen zdroj referenčního napětí, kondenzátor a tranzistorový spínač. Při určitém poměru odporů v obvodu dochází k tomu, že kondenzátorem bude protékat konstantní proud, který bude kondenzátor nabíjet. Princip nabíjení kondenzátoru a vybíjení skrze tranzistorový spínač je řešen prakticky stejně jako v kapitole 2.1. Znamená to, že perioda řídicího pulzu musí být přizpůsobena kapacitě kondenzátoru a nabíjecímu proudu tak, aby byla využita lineární část nabíjecí charakteristiky kondenzátoru a průběh pily měl požadovaný tvar [1].



**Obr.2.3.1** Generátor pily s Howlandovou pumpou, schéma a teoretický průběh [1]

Zesílení generátoru bude určeno podle vzorce 2.3.1 pro neinvertující zapojení operačního zesilovače odpory v záporné zpětné vazbě [2].

Hodnoty odporů volím:

$$R_4 = R_2 = 90 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

Vzhledem ke zvoleným hodnotám je patrné zesílení  $A_u=10$ .

$$U_o = U_c \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (2.3.1)$$

Za předpokladu, že invertující vstup je připojen k zemi a hodnoty odporů v obvodu budou voleny podle následující podmínky [1]:

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} \quad (2.3.2)$$

Pak poteče kondenzátorem konstantní nabíjecí proud, který lze popsat vztahem [1]:

$$I_C = \frac{U_{ref}}{R_3} = \frac{10}{10^3} = 1mA \quad (2.3.3)$$

Činnost generátoru je podobná jako u generátoru z kapitoly 2.1. Nabíjecí proud kondenzátoru je určen následujícími rovnicemi [1]:

$$u_c(t) = \frac{1}{C} \int i_c(t) dt + U_C(t = t_0) \quad (2.3.4)$$

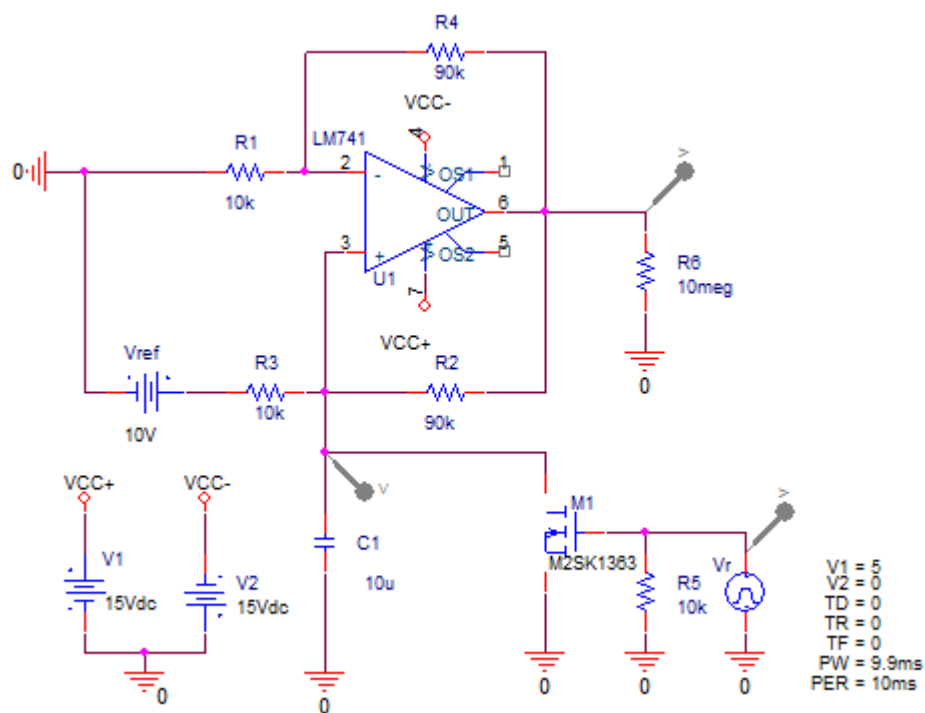
Jelikož vycházím z možnosti, že počáteční napětí na kondenzátoru je nulové a nabíjecí proud bude konstantní, dá se nabíjecí rovnice zjednodušit:

$$u_c(t) = \frac{I}{C} \int dt = \frac{I}{C} t \quad (2.3.5)$$

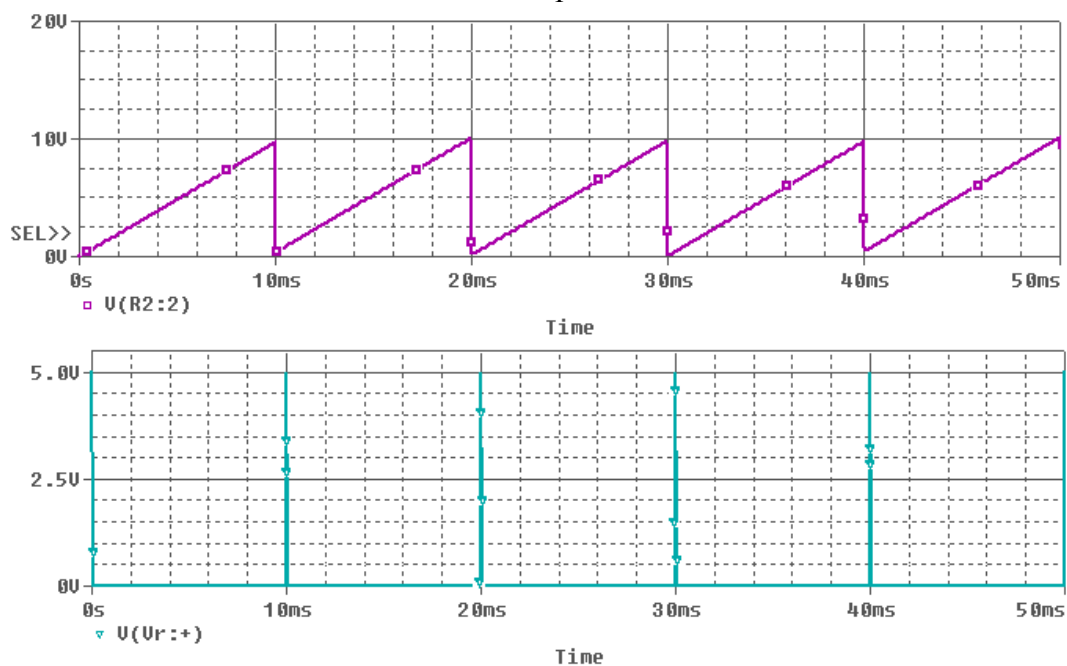
Pro výpočet maximální hodnoty napětí na kondenzátoru i na výstupu operačního zesilovače, která je nejvyšší v čase T (Periodu volím 10ms ), nebo hodnoty napětí v čase jiném, můžeme napsat tento vztah [1]:

$$U_C \cdot t_{t=T} = U_{Cmax} = \frac{I_C}{C} T = \frac{10^{-3}}{10^{-5}} 0,01 = 1V \quad (2.3.6)$$

$$U_o max = U_{Cmax} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = 1 \left( 1 + \frac{90 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} \right) = 10V \quad (2.3.7)$$



**Obr.2.3.2** Schéma z prostředí OrCAD



**Obr.2.3.3** Průběh generátoru pily na výstupu operačního zesilovače

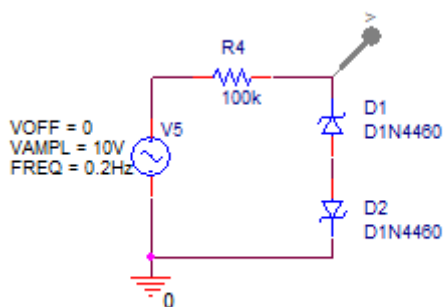
### **Dílčí závěr:**

Na kondenzátoru jsem z grafu odečetl maximální napětí 0,96V. Na výstupu operačního zesilovače pak 9,6V, jelikož jeho zesílení bylo zvoleno  $A_u=10$ .

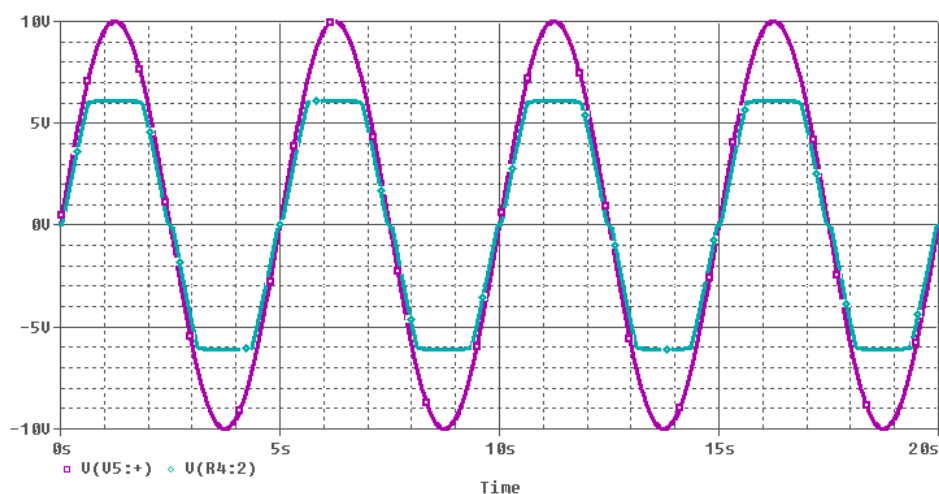
### 3. Funkční generátory

Funkční generátor je zařízení, které vyrábí jednoduchý, opakující se průběh. Moderní zařízení mohou používat digitálního zpracování signálu pro syntézu křivky a poté D/A převodníkem vytvořit analogový signál. Nejběžnější průběh je sinusoida, ale často můžeme vidět také pulzní, obdélníkový nebo trojúhelníkový. Funkční generátory lze rozdělit do dvou základních podskupin, a to na generátory s konstantní nebo proměnou frekvencí.

V této práci se budu věnovat simulaci generátorů trojúhelníkového a obdélníkového průběhu. Na výstupu obdélníkového průběhu použiji omezení amplitudy, pomocí dvojce Zenerových diod. Použil jsem diody typu 1N4460 s velikostí  $U_Z = 6,2V$  a  $U_{FZ}=0.3V$ , takže dojde ke stabilizaci výstupního napětí na 6,5V, což je znázorněno na následujícím grafu. Vzhledem k tomu, že stabilizace bude použita pro obdelníkový průběh, nebude signál zkreslený, ale bude ořezán na maximální napětí limitované parametry Zenerových diod. Pro stabilizaci amplitudy Wienova oscilátoru a oscilátoru s posuvem fáze (viz. další kapitoly) se bude používat metoda jiná.



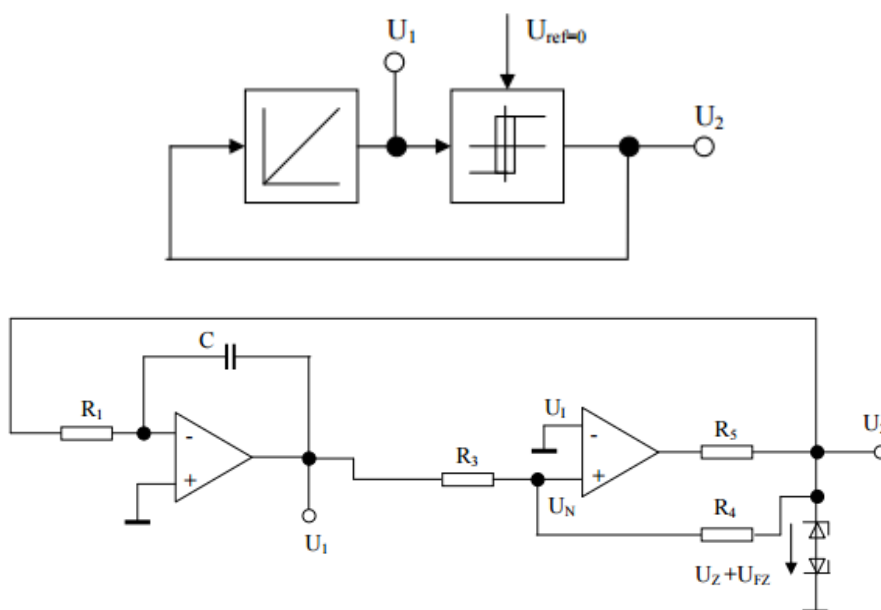
**Obr.3.0.1** Schéma z prostředí OrCad



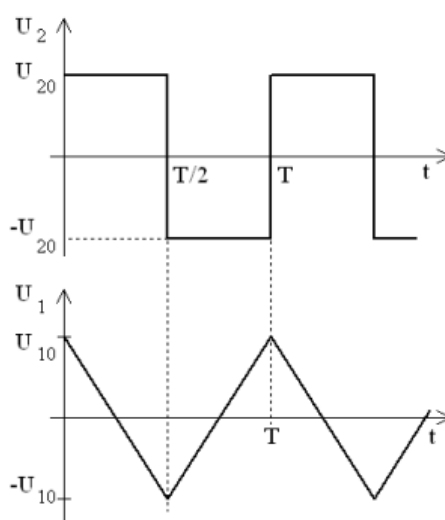
**Obr.3.0.2** Grafický průběh ořezání výstupního napětí Zenerovými diodami

### 3.1. Funkční generátor s konstantní frekvencí

Tento generátor je schopen generovat pro jednu zvolenou frekvenci obdélníkový a trojúhelníkový signál. Trojúhelníkový signál vytvoříme operačním zesilovačem zapojeným jako integrátor, budeme-li na jeho vstup přivádět střídavě kladné a záporné konstantní napětí. Výstupní napětí integrátoru se přivádí na komparátor, který vytváří stabilizovaný obdélníkový průběh. Když je dosaženo horní překlápěcí úrovně  $U_{10}$ , výstupní napětí skočí na  $U_{20}$  a naopak. A právě tyto dvě napěťové úrovně se přivádí zpět na vstup integrátoru pro zajištění nepřetržitého chodu [1, 3].



**Obr.3.1.1** Blokové schéma a zapojení funkčního generátoru s konstantní frekvencí [1]



**Obr.3.1.2** Časové průběhy napětí funkčního generátoru s konstantní frekvencí [1]

Výstup je ošetřen Zenerovými diodami pro stabilizaci výstupního napětí. Pro simulaci obvodu jsem zvolil frekvenci 1 kHz (perioda bude tedy 1ms), která se dosadí do vzorce a dále se vhodně zvolí kapacita kondenzátoru z tabulkových hodnot a dopočte velikost rezistoru  $R_1$ .

Pro komparátor platí rovnice [1]:

$$U_N = \frac{R_4}{R_3+R_4} U_1 + \frac{R_3}{R_3+R_4} U_2 \quad (3.1.1)$$

Ke změně výstupního napětí komparátoru dojde, pokud bude splněna tato podmínka [1]:

$$U_I = U_N \Rightarrow U_1 = -\frac{R_3}{R_4} U_2 \quad (3.1.2)$$

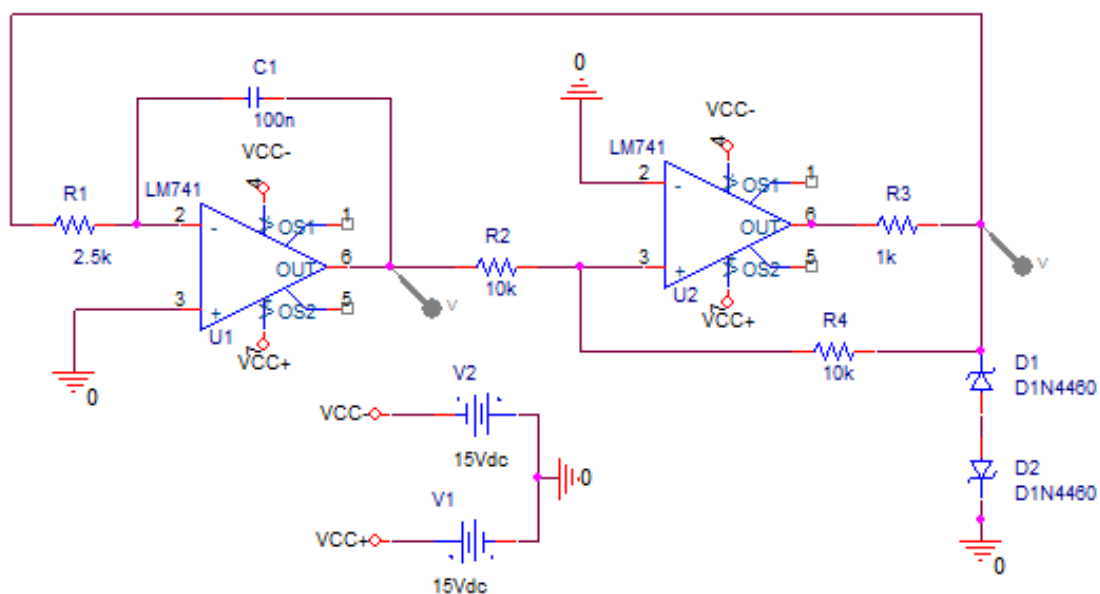
Výpočet prvků pro zvolenou frekvenci [1]:

$$T = 4 \cdot R_1 \cdot C \cdot \frac{R_3}{R_4} \quad (3.1.3)$$

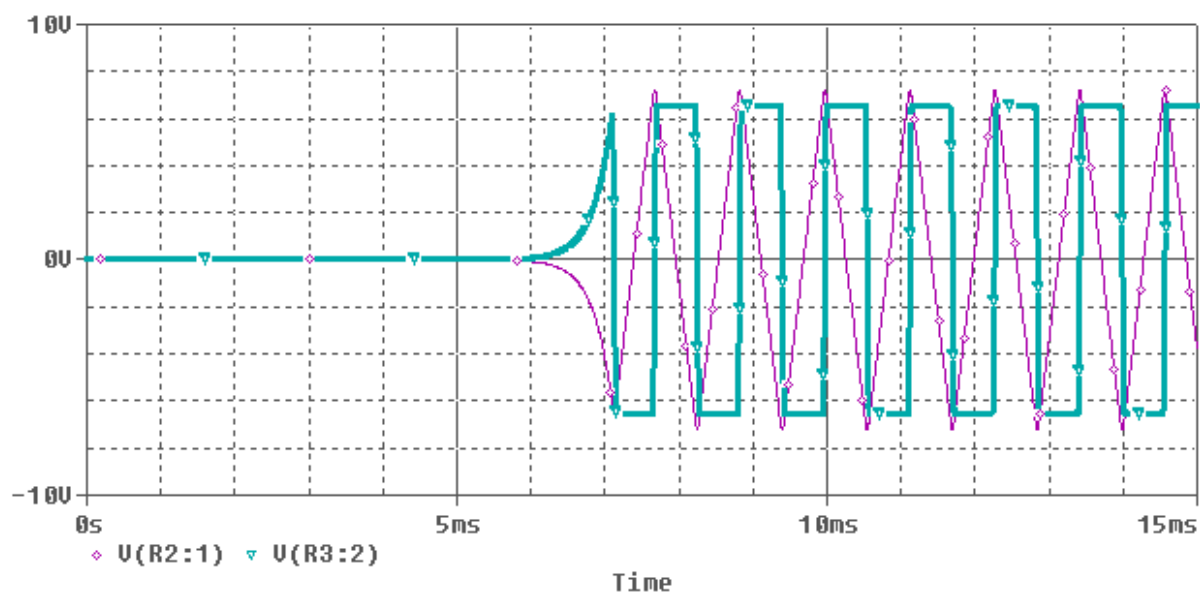
$$R_1 \cdot C = \frac{1}{4T} = 2,5 \cdot 10^{-4}$$

*C1 volím 100 nF*

$$R_1 = \frac{2,5 \cdot 10^{-4}}{100 \cdot 10^{-9}} = 2,5 \text{ k}\Omega$$



**Obr.3.1.3** Schéma funkčního generátoru z prostředí OrCad



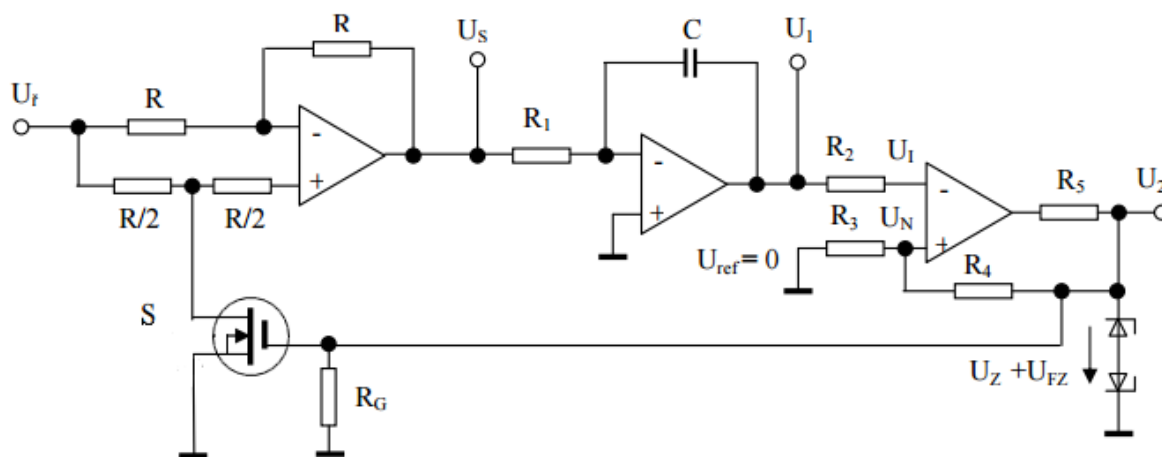
**Obr.3.1.1** Grafický průběh funkčního generátoru

#### ***Dílčí závěr:***

*V simulovaném zapojení jsem z grafu odečetl periodu 1,1ms a maximální výstupní napětí 6.5V, které je na tuto hodnotu stabilizováno Zenerovými diodami.*

### 3.2. Funkční generátor s proměnnou frekvencí

Tento generátor se skládá z tří základních členů a to ze střídače napětí, integrátoru a komparátoru s hystezí. Frekvence výstupního trojúhelníkového napětí  $U_1$  a obdélníkového napětí  $U_2$  je závislá na řídicím napětí  $U_r$ . Řídicí napětí je tvořeno zdrojem konstantního napětí [1].



Obr.3.2.1 Blokové schéma a schéma zapojení

Pro komparátor platí následující rovnice [1]:

$$U_N = \frac{R_3}{R_3 + R_4} U_2 = \frac{10 \cdot 10^4}{10 \cdot 10^4 + 10^3} 6,5V = 6,4V \quad (3.2.1)$$

$$U_I = U_1 \quad (3.2.2)$$

$$U_I = U_N \quad (3.2.3)$$

$$\pm U_{20} = \pm (U_Z + U_{FZ}) = 6,5V \quad (3.2.4)$$

Rovnice pro výpočet periody při  $U_r=1V$  [1] :

$$T = 4 \cdot R_1 \cdot C \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4} \cdot \frac{U_{20}}{U_r} \quad (3.2.5)$$

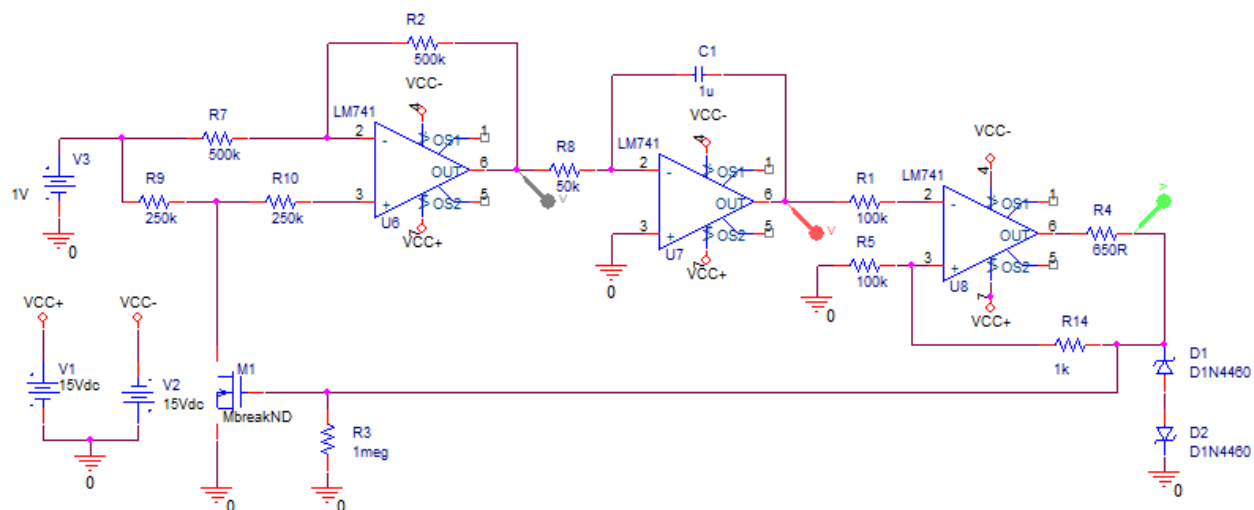
$$T = 4 \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{10 \cdot 10^4}{10 \cdot 10^4 + 10^3} 6,5V = 1,3s \quad (\text{odečteno } 1,35s)$$

Rovnice pro výpočet periody při  $U_r=10V$  [1] :

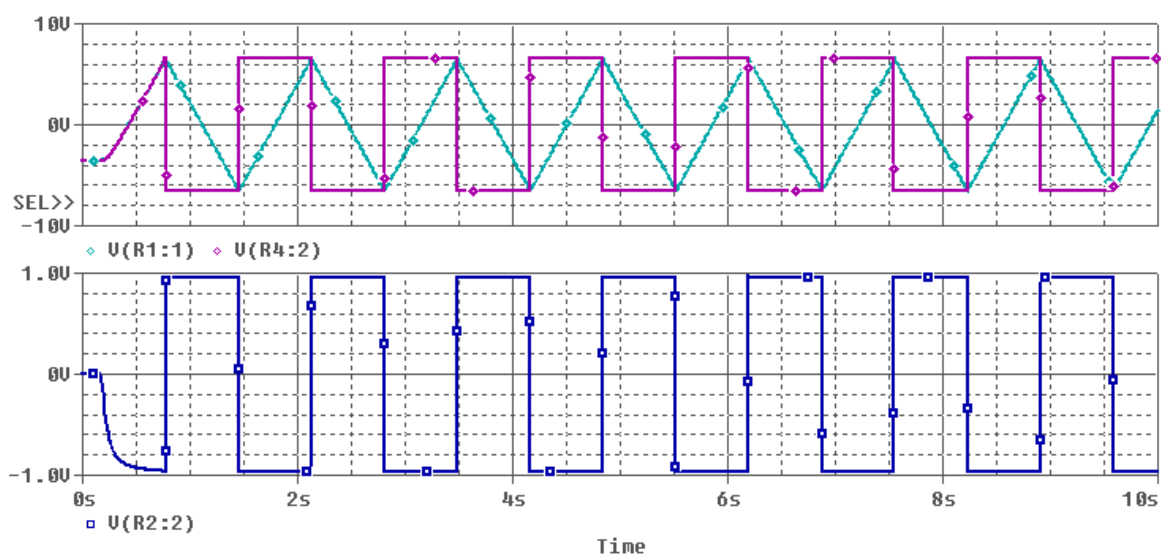
$$T = 4 \cdot R_1 \cdot C \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4} \cdot \frac{U_{20}}{U_r}$$

$$T = 4 \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{10 \cdot 10^4}{10 \cdot 10^4 + 10^3} \frac{6,5}{10} = 130ms \quad (\text{odečteno } 133ms)$$

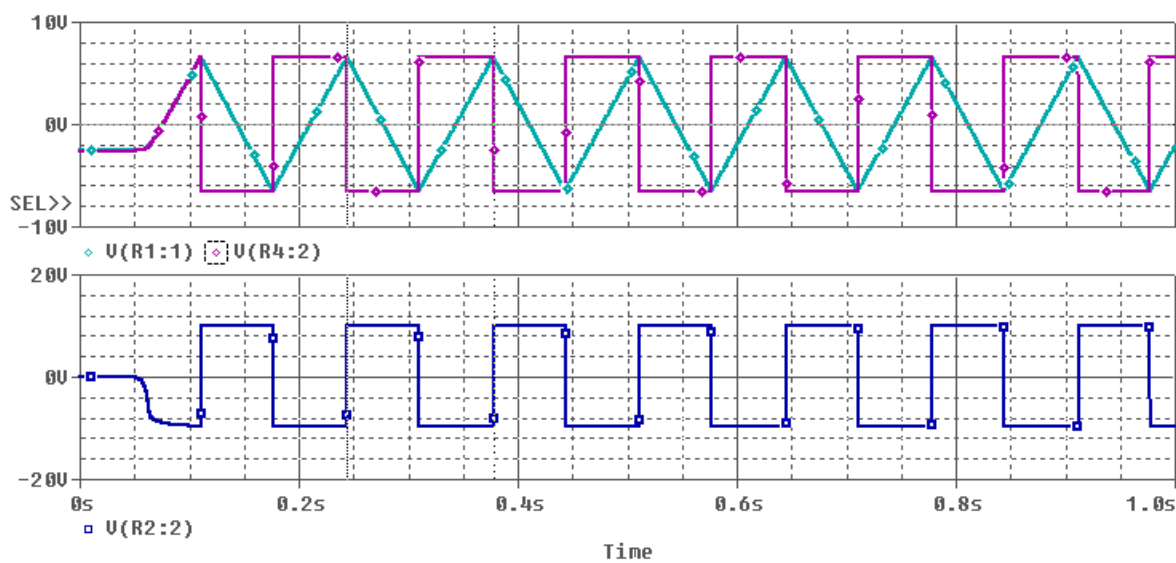




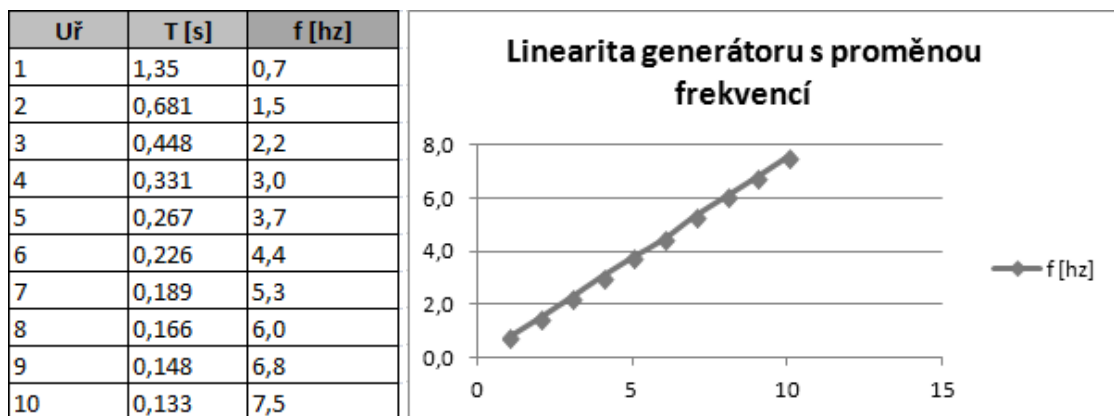
**Obr.3.2.2** Schéma generátoru z prostředí OrCAD



**Obr.3.2.3** Graf průběhu generátoru v čase pro řídicí napětí 1V



**Obr.3.2.4** Graf průběhu generátoru v čase pro řídicí napětí 10V



**Obr.3.2.5** Grafické znázornění linearity pro zvolený frekvenční rozsah včetně tabulky

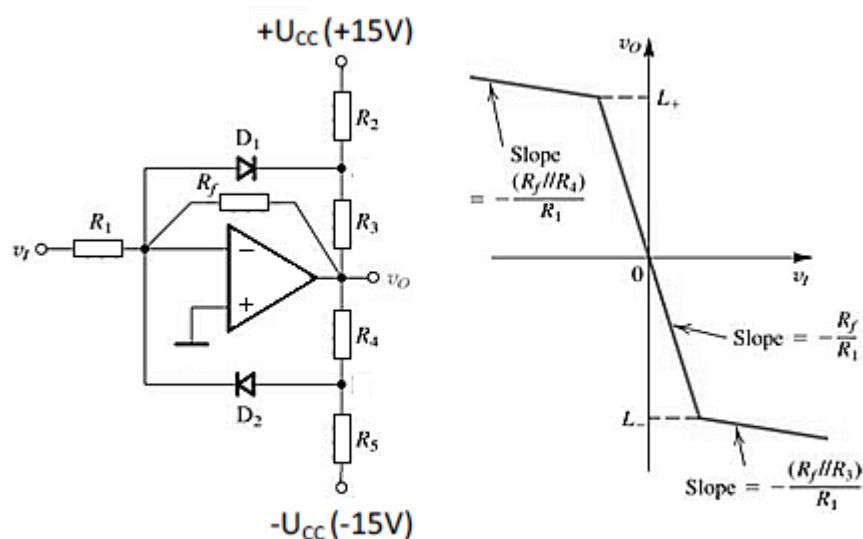
### ***Dílčí závěr:***

*Z grafických výsledků je patrné, jak se mění frekvence v závislosti na řídicím napětí. Čím je řídicí napětí vyšší, tím je vyšší frekvence na výstupu. Pro zvolený rozsah je nárůst frekvence vůči napětí lineární, avšak během lazení obvodu jsem se setkal i s rozsahem frekvencí, kde byly v linearitě pozorovatelné výkyvy a při špatném nastavení komparátoru se vyskytovaly problémy se střídou.*

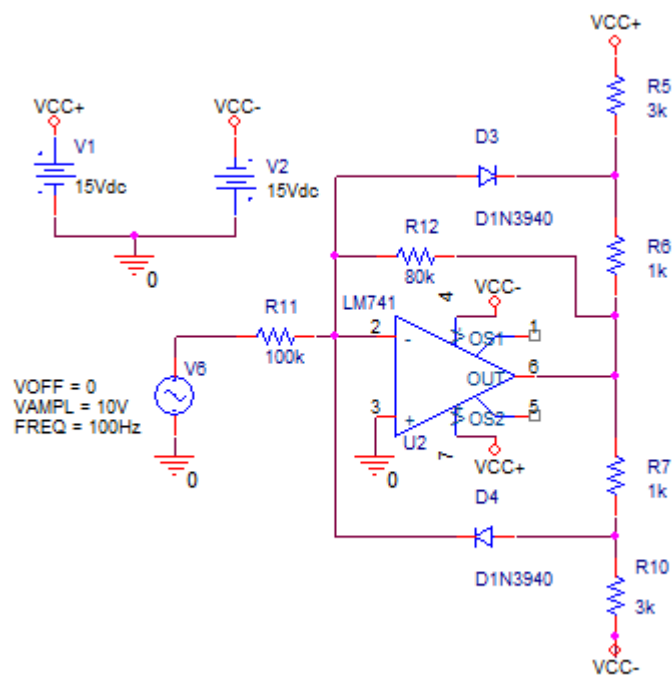
## 4. RC Oscilátory s diodovými omezovači amplitudy

### 4.1. Diodový omezovač amplitudy s operačním zesilovačem

Tento typ omezovače má ve zpětné vazbě zapojeny diody a rezistory tak, aby bylo možné těmito prvky regulovat omezení amplitudy výstupního napětí operačního zesilovače. Omezovač amplitudy dynamicky mění zesílení a udržuje jej na žádané hodnotě. V případě poklesu pod tuto hodnotu by došlo k útlumu kmitání oscilátoru a naopak při vyšším zesílení by amplituda oscilátoru rostla.

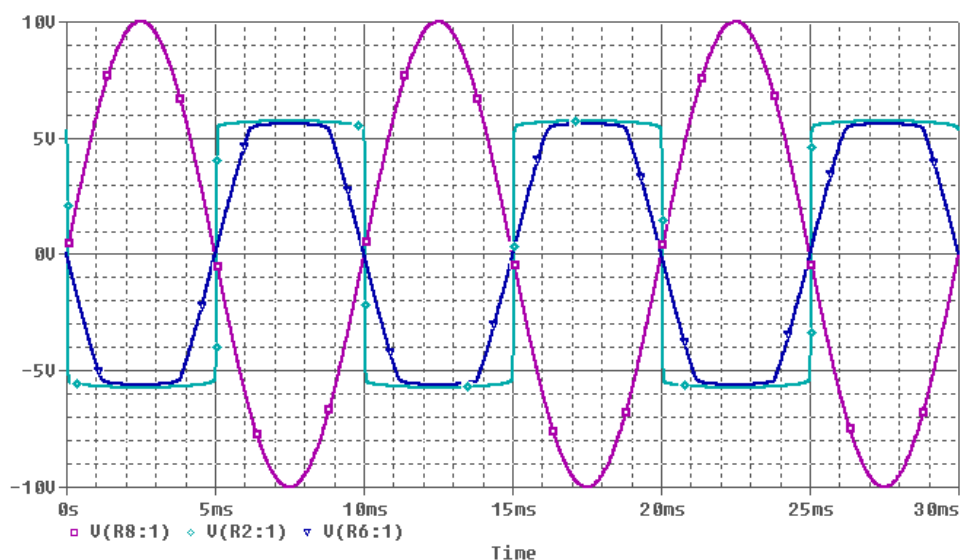


Obr.4.1.1 Schéma a charakteristika diodového omezovače



#### Obr.4.1.2 Schéma omezovače amplitudy z prostředí OrCad

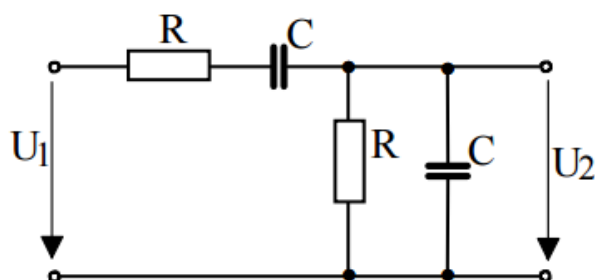
Následující graf znázorňuje vstupní průběh (fialový) a dva omezené průběhy. Světle modrý průběh je téměř obdelníkový ( pro  $R_f = \infty$ ), tmavě modrý průběh znázorňuje omezení s hodnotou  $R_f = 80\text{k}\Omega$ , kde je viditelné menší zkreslení signálu. Snižováním hodnoty  $R_f$  dosáhneme menšího zkreslení signálu.



Obr.4.1.3 Schéma a průběh omezovače amplitudy s operačním zesilovačem

## 4.2. Oscilátor s Wienovým členem

Oscilátor s Wienovým členem je harmonický oscilátor zpětnovazebního typu, jehož kladná zpětná vazba je tvořena Wienovým členem (*Obr. 4.2.1*). Oscilátor obsahuje kromě frekvenčně závislé kladné zpětné vazby s Wienovým článkem, která má na kmitočtu  $f_0$  nejvyšší přenos a nulový fázový posuv, také frekvenčně nezávislou zápornou zpětnou vazbu určující zesílení operačního zesilovače za pomoci odporového děliče. Tento oscilátor, je třeba doplnit obvodem pro stabilizaci amplitudy, což bude provedeno v následujících kapitolách. Pro tento typ oscilátoru je vhodné volit neinvertující zapojení operačního zesilovače, jelikož je zapotřebí, aby zesilovač neobracel fázi. V opačném případě by bylo třeba použít dva invertující členy za sebou.



*Obr. 4.2.1* Schéma Wienova členu [2]

Oscilátor začne kmitat, budou-li splněny obě základní podmínky pro vznik oscilací.

### Podmínky oscilace:

První podmínka se nazývá Amplitudová a znamená, že zesilovač musí kompenzovat ztráty zpětnovazebního obvodu [2].

$$A\beta = 1 \quad (4.2.1)$$

Druhá podmínka fázová, kde  $k$  je celé číslo, říká, že fázový posuv mezi vstupem a výstupem musí být roven nule [2]:

$$\varphi = 2k\pi \quad (4.2.2)$$

Fázová podmínka bude splněna na kmitočtu  $f_0$  [2]:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (4.2.3)$$

Pokud je fázová podmínka splněna, na kmitočtu  $f_0$  vychází napěťový přenos Wienova členu [2]:

$$A_{f_0} = \frac{1}{3} \quad (4.2.4)$$

Jelikož je přenos Wienova členu zároveň také hodnotou  $\beta$ , je pro splnění amplitudové podmínky nutno, aby měl operační zesilovač nastaveno zesílení  $A = 3$ .

V následujících úlohách budu simulovat Wienovy oscilátory s následující kombinací RC členů:

$$R = 10 \text{ k}\Omega$$

$$C = 16 \text{ nF}$$

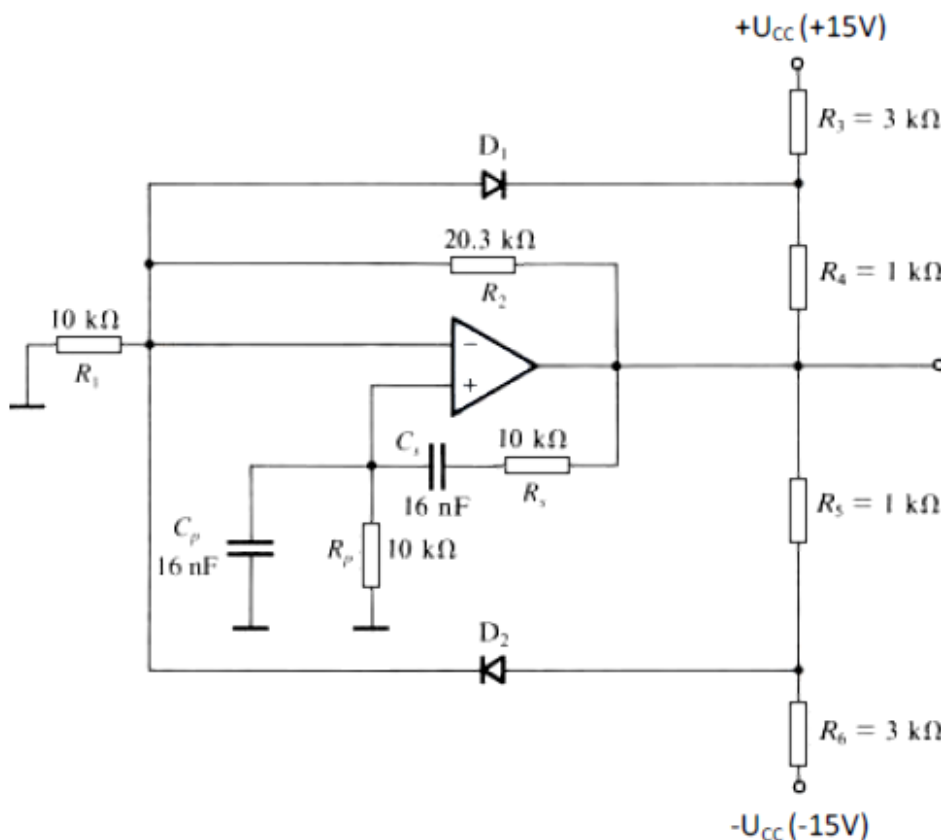
**Výpočet oscilační frekvence:**

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 16 \cdot 10^{-9}} \cong 995 \text{ Hz} \quad (4.2.5)$$

Z výpočtu je patrné, že perioda oscilátoru bude přibližně 1 ms. To budu ověřovat v následujících dvou kapitolách, kdy teoretický výpočet bude srovnán s odečtenými výsledky z grafických výstupů simulovaných obvodů.

### 4.3. Wienův oscilátor s operačním zesilovačem a amplitudovou stabilizací

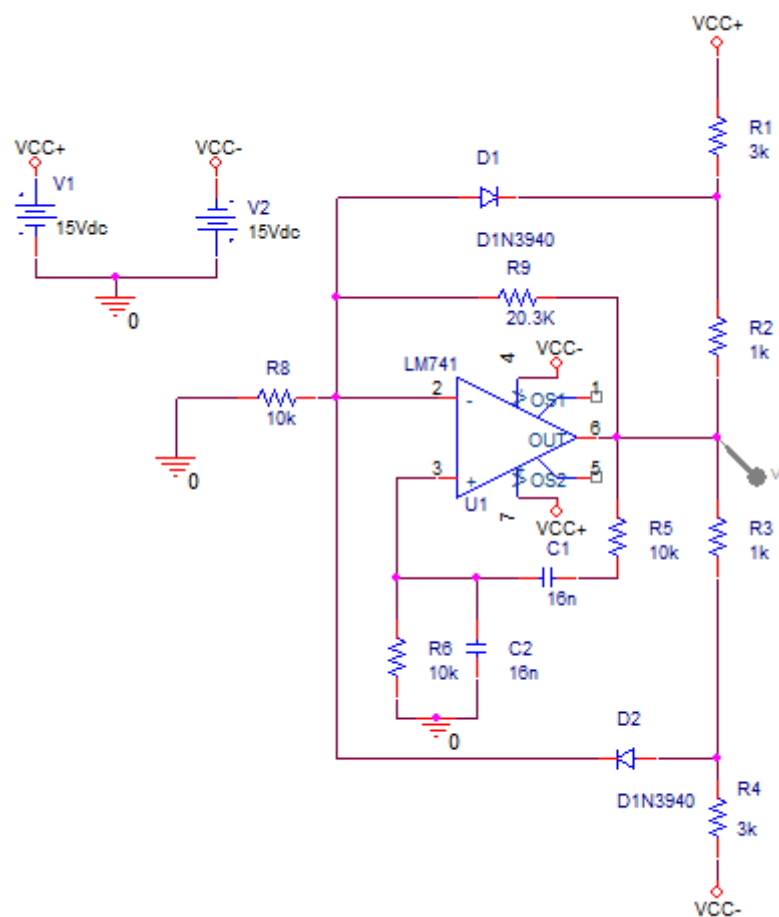
Na Wienův oscilátor aplikujeme amplitudovou stabilizaci z předchozí kapitoly. Amplituda se na určité hodnotě ustálí a nedojde tak k nežádoucímu nárůstu amplitudy který by vedl ke zkreslení a ořezání výstupního signálu. Zesílení operačního zesilovače je nastaveno odpory podle vzorce pro zesílení neinvertujícího zesilovače pro  $A_u=3$ .



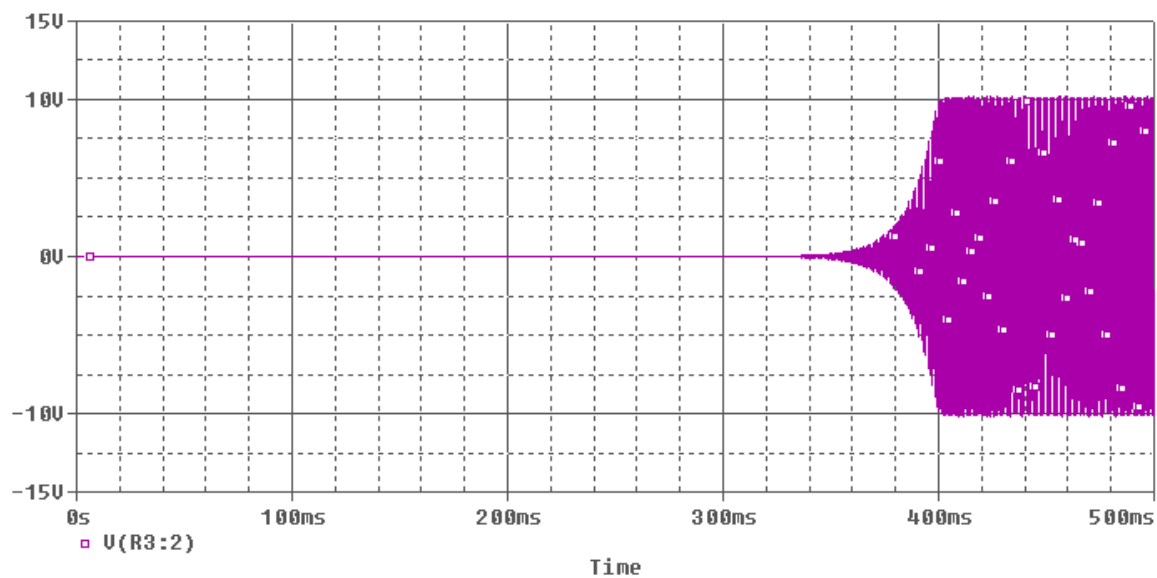
**Obr.4.3.1** Schéma Wienova oscilátoru s amplitudovou stabilizací

Vzorec pro zesílení neinvertujícího zesilovače včetně dosazených hodnot a výpočtu [2]:

$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{20,3 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = 3,03 \quad (4.3.1)$$

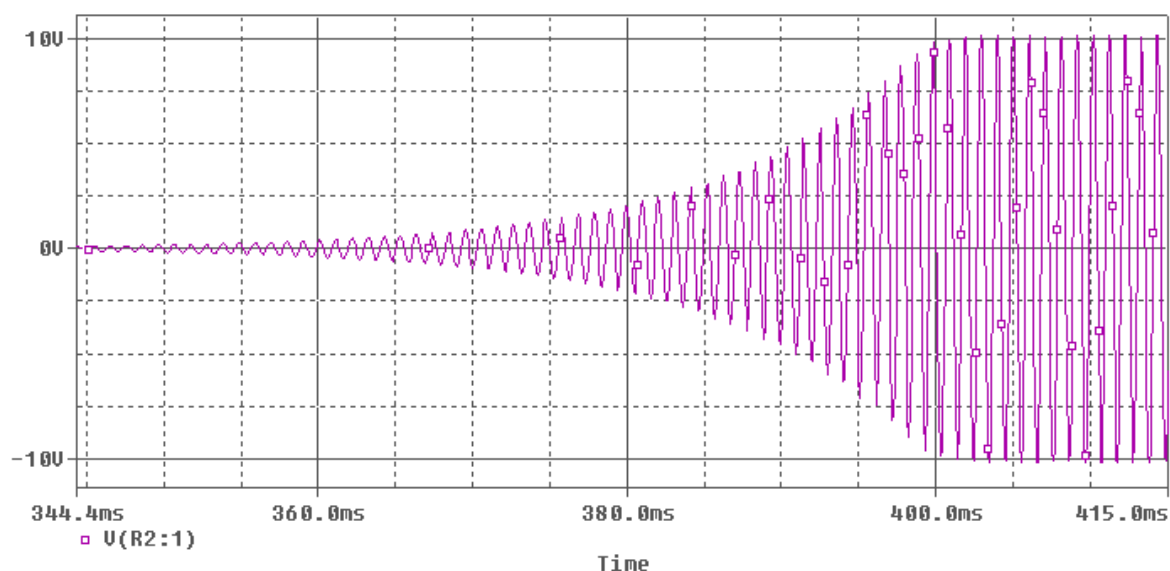


**Obr.4.3.2** Schéma Wienova oscilátoru z prostředí OrCad

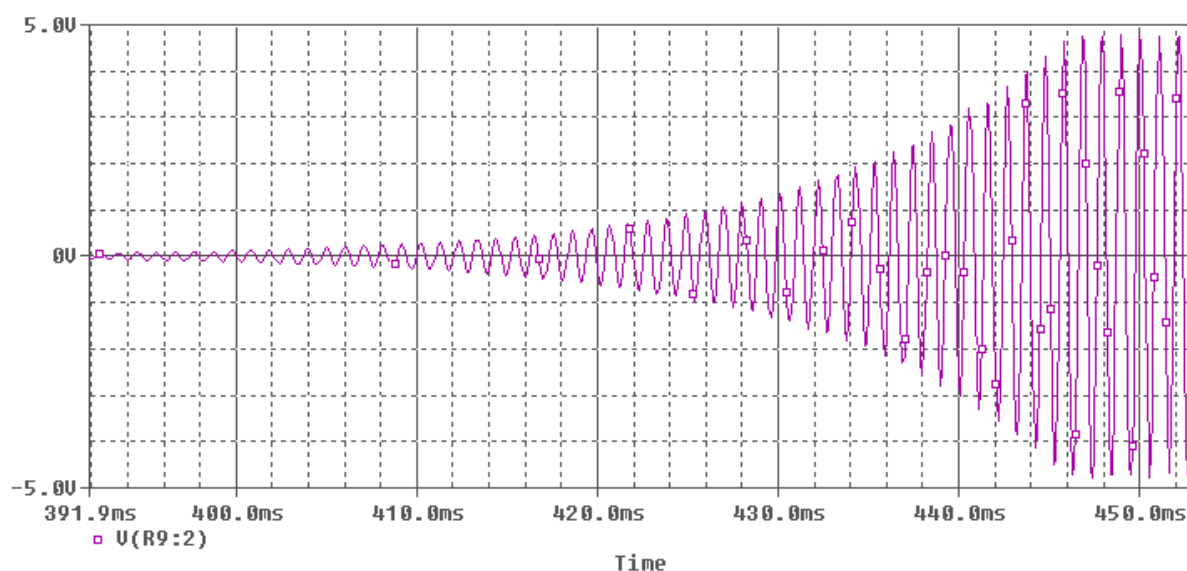


**Obr.4.3.3** Grafický průběh RC oscilátoru v čase s omezením amplitudy na 10V





**Obr.4.3.4** Výřez průběhu oscilátoru s lepší viditelností rozkmitání



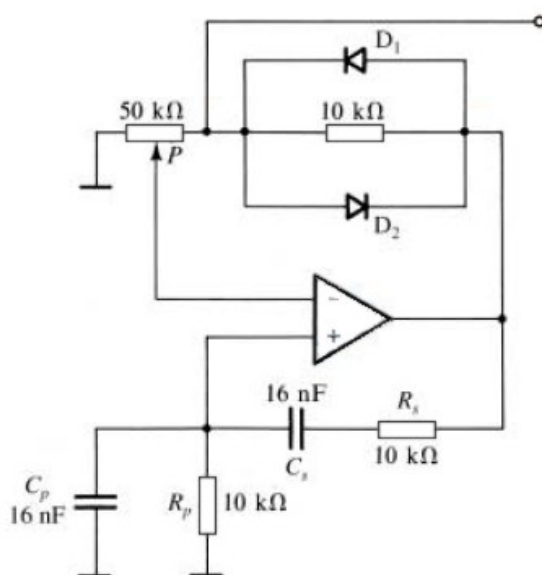
**Obr.4.3.5** Výřez průběhu s omezením amplitudy na 5V ( $R_2=R_3=500\Omega$ )

### ***Dílčí závěr:***

Z grafu na obr.4.3.3 jsem odečetl periodu 1,03ms (970Hz) a ustálení amplitudy na 10,1V. Pro názornou ukázkou regulace amplitudy jsem změnil hodnotu odporů  $R_2$  a  $R_3$  na  $500\Omega$ , kdy se velikost amplitudy zmenšila na poloviční velikost při stejné periodě. Výsledek je možno vidět v grafu na obr. Z grafu na obrázku 4.3.5 jsem odečetl periodu 1,04ms (961Hz) a ustálení amplitudy na 4,7V.

#### 4.4. Wienův oscilátor s alternativní metodou amplitudové stabilizace

Obvod oscilátoru je prakticky shodný s obvodem z předchozí kapitoly, avšak je na něm aplikován jiný typ diodové stabilizace amplitudy než v kapitole předchozí. Zesílení operačního zesilovače je přibližně  $A_u=3$  a je nastaveno potenciometrem. V případě poklesu pod tuto hodnotu zesílení, by došlo k útlumu kmitání, naopak při vyšším zesílení by amplituda rostla. Do obvodu je přidána kompenzace pro stabilizaci amplitudy. Konkrétně se jedná o antiparalelně zapojené diody 1N3940 a k nim paralelně zapojený rezistor. Tato kompenzace stejně jako předchozí metoda dynamicky mění zesílení a udržuje jej na žádané hodnotě. V případě poklesu pod tuto hodnotu by došlo k útlumu kmitání a naopak při vyšším zesílení by amplituda rostla.



**Obr.4.4.1** Zadané schéma Wienova oscilátoru

Vzorec pro výpočet mezní frekvence je stejný jako v prvním případě s Wienovým oscilátorem to:

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 16 \cdot 10^{-9}} \cong 995 \text{ Hz} \quad (4.4.1)$$

**Výpočet hodnoty zesílení:**

$$R_p = 0,64R_a + 0,36R_b = 50 \text{ k}\Omega \quad (4.4.2)$$

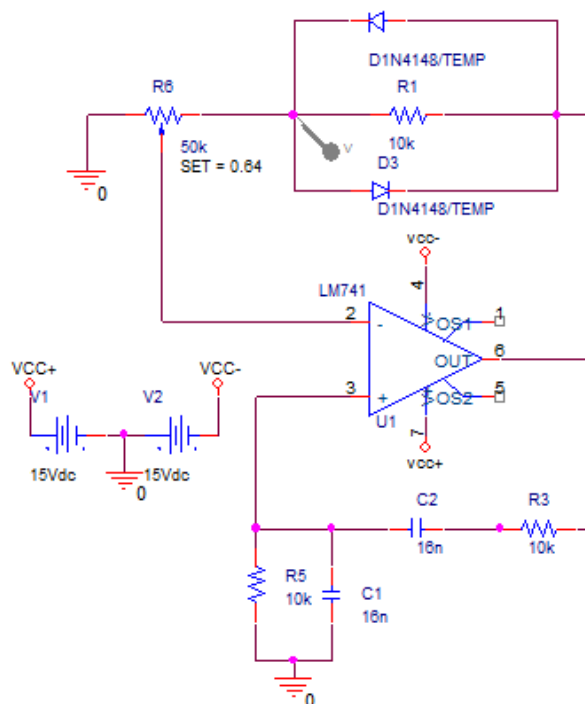
$$R_a = 32 \text{ k}\Omega$$

$$R_b = 18 \text{ k}\Omega$$

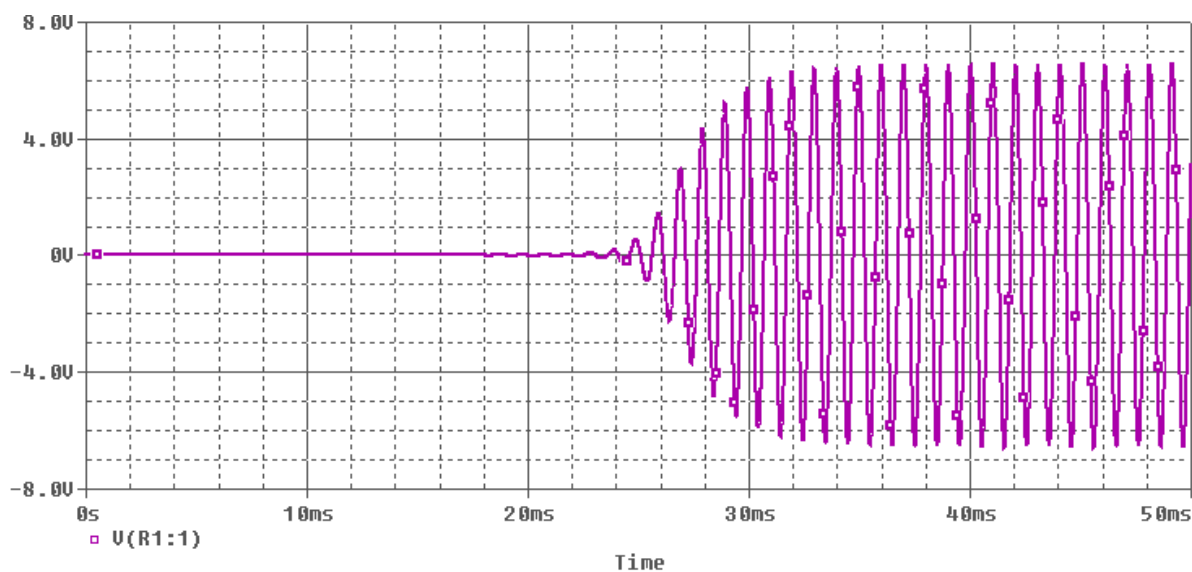
$$A_u = 1 + \frac{R_a}{R_b} = 1 + \frac{32 \cdot 10^3}{18 \cdot 10^3} = 2,78 \quad (4.4.3)$$

$$U_I = \text{Napětí neinvertujícího vstupu} = 2,3 \text{ V}$$

$$U_O = U_I \cdot A_u = 6,39 \text{ V} \quad (4.4.4)$$



**Obr.4.4.2** Schéma Wienova oscilátoru s jiným způsobem stabilizace amplitudy



**Obr.4.4.3** Průběh Wienova oscilátoru

#### ***Dílčí závěr:***

*Z grafu jsem odečetl periodu 1,012ms (988Hz) a ustálení amplitudy na 6,4V, což přesně odpovídá výpočtu. Tato metoda stabilizace je na rozdíl od metody z předchozí kapitoly regulovatelná hůř, jelikož potenciometr pro regulaci amplitudy zároveň tvoří dělič, kterým je nastaveno zesílení OZ a změnou velikosti odporu dochází také ke změně doby náběhu respektive doby, která uběhne, než se oscilátor rozkmitá. Regulace amplitudy je možná jen v úzkém rozpětí dráhy potenciometru a jen malá změna polohy vyvolá velkou změnu amplitudy, která vede buď k útlumu anebo ke zkreslení signálu.*

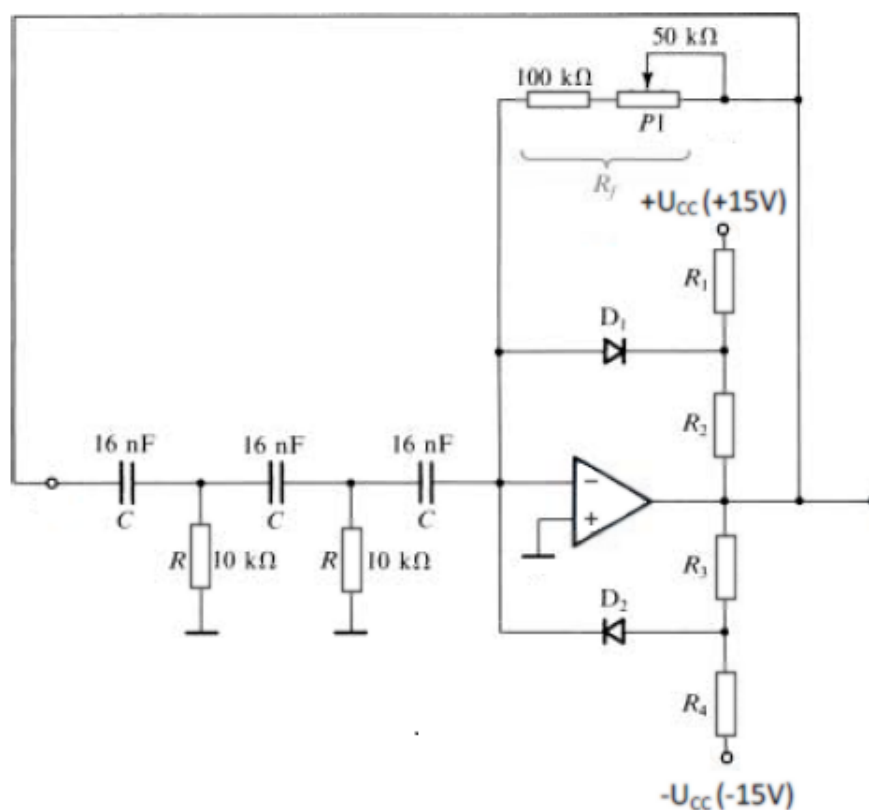
## 4.5. Oscilátor s posuvem fáze

Harmonický oscilátor s posuvem fáze funguje tak, že ve zpětné vazbě operačního zesilovače je zapojena kaskáda RC členů. Na první pohled je zřejmé, že každý RC člen posouvá fázi o  $60^\circ$ . Faktem je, že každý následující člen zatěžuje ten předchozí a to znamená, že fázový posun jednotlivých členů není přesných  $60^\circ$ , avšak výsledný posun musí být  $180^\circ$ . To je také první podmínka pro vznik oscilací.

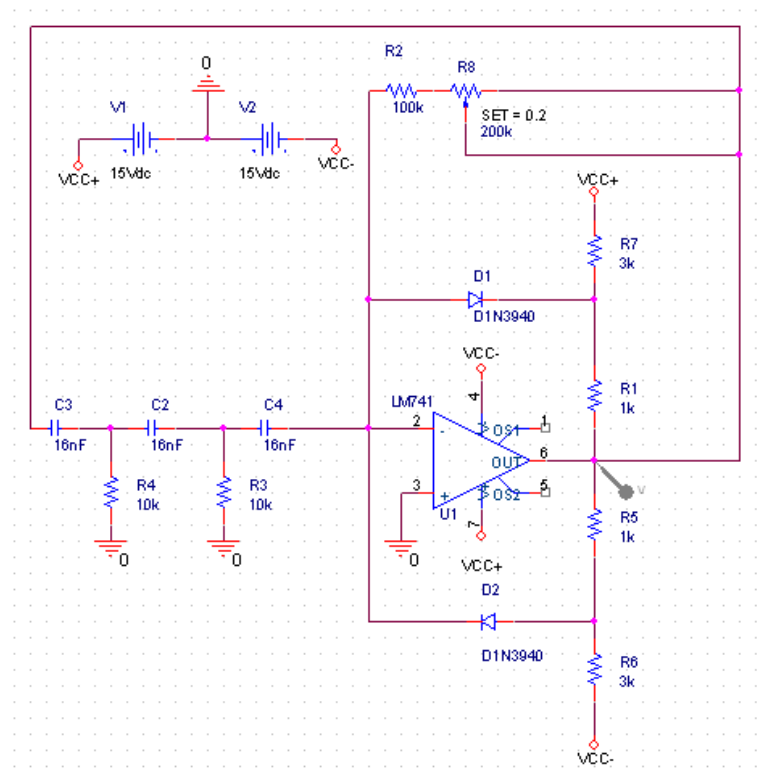
Jelikož zesílení oscilátorů musí být rovno 1, je tedy pro splnění amplitudové podmínky nutno, potenciometrem  $P_1$  nastavit správnou hodnotu odporu tak, aby se obvod rozkmital.

Vzorec pro výpočet mezní frekvence pak má tvar [2]:

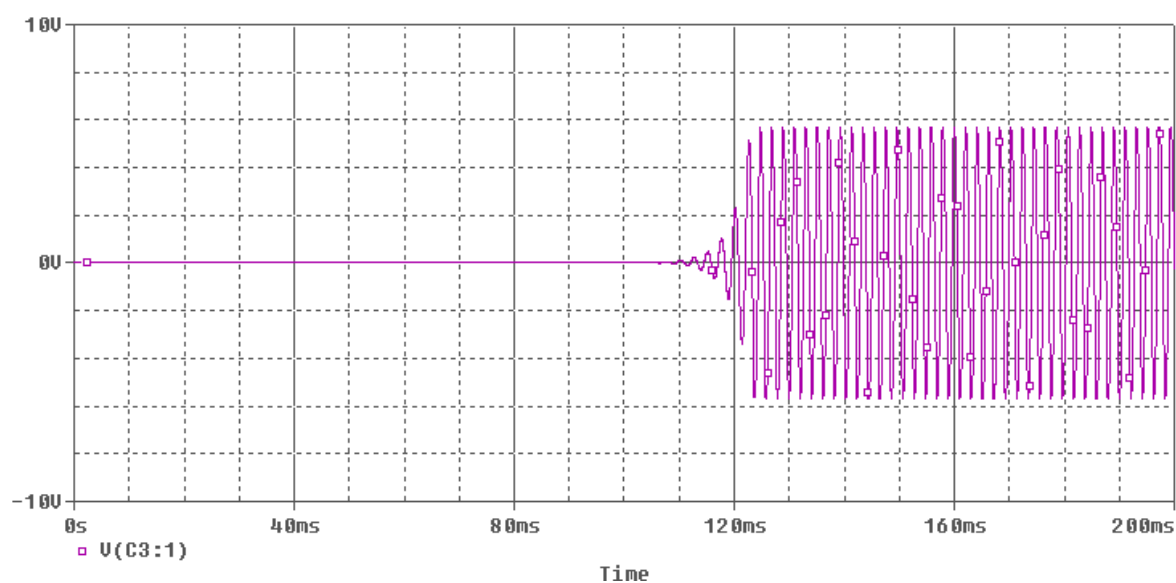
$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{6} \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{6} \cdot R \cdot C} = 406 \text{ Hz } (2,46 \text{ ms}) \quad (4.5.1)$$



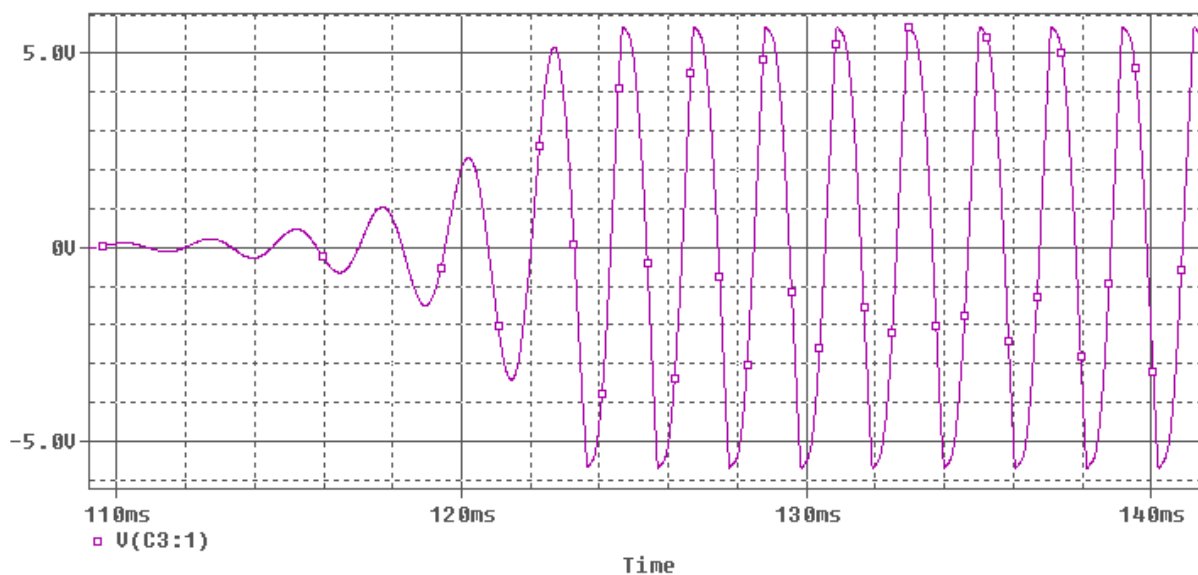
**Obr.4.5.1** Schéma oscilátoru s posuvem fáze s amplitudovou stabilizací



**Obr.4.5.2** Schéma oscilátoru s posuvem fáze v prostředí OrCad



**Obr.4.5.3** Průběh celé simulace oscilátoru s posuvem fáze



**Obr.4.5.4** Výřez průběhu oscilátoru s posuvem fáze s lepší viditelností průběhu

***Dílčí závěr:***

*Z grafu jsem odečetl periodu simulace 2.1ms (476Hz) a ustálení amplitudy na 5.7V. Jelikož je poměrně složité nastavit na tomto typu oscilátoru přesně periodu, používá se spíše zřídka. S problémem nastavení periody souvisí i amplituda, která může mít nestálý charakter a dochází ke zkreslení jinak sinusového průběhu.*

## **5. Závěr**

Úkolem této práce bylo prostředí programu OrCad simulovat chod vybraných analogových generátorů signálů. Chod všech simulací generátorů se mi povedlo i přes občasné problémy se správnou simulací zdárně ověřit a výsledky jsou uvedeny v jednotlivých dílčích závěrech popřípadě výpočtech.

Přínosem této bakalářské práce pro mě bylo v každém případě vyzkoušení vědomostí získaných během studia. Možnost simulovat elektronické obvody v prostředí OrCad také podstatně zjednodušuje práci, jelikož je možné bez reálných konstrukcí bez problému měnit parametry obvodu a zkoumat jeho průběhy v čase nebo chování při jiných analýzách.

## 6. Literatura

- [1] BRANDŠTETTER, Pavel. Analogové elektrické obvody. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2012.
- [2] BRANDŠTETTER, Pavel. Elektronika. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2005.
- [3] PAVELEK, Tomáš. Modelování a simulace elektronických systémů. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2006.